

Н.Э. ЭВОЯН, Г.А. КАРДАШЯН

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ТРАНСПОРТНЫХ ТАРАХ С ОСОБО ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ПРОДУКТОМ

Разработана методика расчета электрического поля в транспортных тарах с высокодисперсным иницирующим веществом с точки зрения оценки искроопасности явления статической электризации.

**Ключевые слова:** методика, электрическое поле, заряд, потенциал, порошковый материал, утечка, искра, емкость, двухфазная система.

**1. Обратные утечки заряда за счёт электропроводности осаденного продукта в осадительных емкостях технологической системы.** Исследование разрядки заряженной массы обрабатываемого продукта в осадительных емкостях позволяет оценить степень накопления зарядов в этих сосудах и, следовательно, возможность возникновения в них опасных электрических разрядов. Рассмотрим с этой точки зрения процесс утечки зарядов через электропроводность плотной массы продукта в осадительном сосуде (см. рис.).

Средний потенциал заряженной массы относительно заземленной металлической поверхности, согласно Хоу [1], равен

$$U_{\text{cp}} = \frac{\rho_{\text{об}} H}{2\varepsilon_0 \varepsilon} \left| R + H - \sqrt{R^2 + H^2} \right|, \quad (1.1)$$

где  $\rho_{\text{об}}$  – удельный объемный заряд осаденной массы продукта;  $H$  и  $R$  – высота и радиус цилиндрического слоя.

Тогда

$$C = \frac{q}{U_{\text{cp}}} = \frac{\rho_{\text{об}} \pi R^2 H}{U_{\text{cp}}} = \left[ \frac{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon R^2}{R + H - \sqrt{R^2 + H^2}} \right], \quad (1.2)$$

где  $q$  – заряд слоя, а сопротивление утечки:

$$R_{\text{ут}} = \frac{H}{2\pi R^2 \gamma_{\text{об}}}, \quad (1.3)$$

$\gamma_{\text{об}}$  – удельная электропроводность слоя;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества.

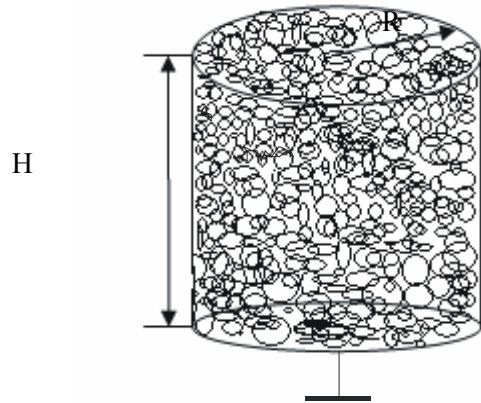


Рис. Схема расчета сопротивления утечки зарядов плотной массы продуктов в осадительных емкостях

Из полученных выражений можно определить постоянную времени разрядки:

$$T = R_{yt} C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon H}{\gamma_{об} \left[ R + H - \sqrt{R^2 + H^2} \right]}. \quad (1.4)$$

Время, необходимое для разрядки заряженной массы продукта до значения заряда  $q_k = q_0 n$  (где  $n < 1$ ), равно

$$t_k = R_{yt} C \ln n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\gamma_{об} \left[ \frac{R}{H} + 1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{Hr^*}} \right]} \ln n. \quad (1.5)$$

Рассмотрим три характерных случая:

а)  $R = H$ . Тогда

$$t_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{0,59 \gamma_{об}}, \quad (1.6)$$

т.е. время разрядки не зависит от размеров осажденного слоя;

б)  $R \gg H$ . Тогда

$$t_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\gamma_{об}} \ln n. \quad (1.7)$$

Получена известная формула релаксации зарядов на поверхности заряженных тел. Такое совпадение не является случайным, так как при  $R \gg H$  практически вся поверхность тела оказывается заземленной, и утечка заряда со всей поверхности по всем направлениям является равновероятной;

в)  $H \gg R$ . Это случай разрядки бесконечно длинной тонкой нити, конец которой заземлен. Тогда

$$t_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\gamma_{об} [1-1]} \rightarrow \infty, \quad (1.8)$$

т.е. имеем вполне логичное объяснение.

Полученное выражение можно использовать для определения скорости стекания зарядов в осадительных емкостях технологических систем обработки и транспортировки порошкообразных материалов.

**2. Методика расчета электрических полей в цилиндрических емкостях с двухфазными системами <<газ-твердая фаза>> (Г-Т).** Предлагаемая методика основана на численно-аналитическом решении уравнения Пуассона. Исходными данными для расчета полей являются конфигурация аппарата и распределение объемной плотности зарядов в нем. Данная методика может быть распространена на все цилиндрические аппараты с двухфазными системами Г-Т, как металлические, так и диэлектрические. Так как рассматриваемые аппараты имеют форму цилиндров, то исследуется осесимметричное поле. Полученные аналитические решения позволяют также построить номограммы для инженерного проектирования.

Рассмотрим методику аналитических расчетов электрических полей в цилиндрических аппаратах. Потенциал в любой точке аппарата будем искать в виде

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} B_n(Z) J_0 \left( x_n \frac{r}{R} \right). \quad (2.1)$$

При этом  $B_n(Z)$  удовлетворяют обыкновенным дифференциальным уравнениям:

$$B_n'' - \alpha_n^2 B_n(Z) = -\frac{\alpha_n(Z)}{\varepsilon}, \quad (2.2)$$

где  $\alpha_n = x_n/R$ .

Граничные условия:  $B_n(0) = B_n(H)$  (электропроводящие корпус и крышка емкости заземлены). Решая это уравнения методом вариации произвольных постоянных [2], получим окончательное решение:

$$B_n(Z) = \frac{1}{\varepsilon_0 \alpha_n} \int_0^z \alpha_n(\zeta) \operatorname{sh}[\alpha_n(\zeta - z)] d\zeta + \frac{\operatorname{sh}(\alpha_n z)}{\varepsilon_0 \alpha_n \operatorname{sh}(\alpha_n H)} \cdot \int_0^z \alpha_n(\zeta) \operatorname{sh}[\alpha_n(H - \zeta)] d\zeta. \quad (2.3)$$

При этом

$$B_n'(z) = -\frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^z \alpha_n(\zeta) \operatorname{ch}[\alpha_n(\zeta - z)] d\zeta + \frac{\operatorname{ch}(\alpha_n z)}{\varepsilon_0 \operatorname{sh}(\alpha_n H)} \int_0^z \alpha_n \operatorname{sh}[\alpha_n \operatorname{sh}(H - \zeta)] d\zeta. \quad (2.4)$$

На функцию  $\alpha_n(z)$  не налагается практически никаких ограничений (требуется только ее непрерывность). Полученные аналитические выражения являются общим решением поставленной задачи.

Для составляющих вектора напряженности электрического поля имеем

$$E_z = \frac{\partial U}{\partial z} = -\sum_{n=1}^{\infty} B'_n(Z) J_0\left(x_n \frac{R}{r}\right). \quad (2.5)$$

$$E_r = \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{\infty} x_n B_n(Z) J_1\left(x_n \frac{r}{R}\right). \quad (2.6)$$

### 3. Методика расчета поля в накопительных емкостях с учетом утечки зарядов продукта.

После обработки в технологическом оборудовании (установках пневмотранспорта, просеивания, размельчения, сушки и т.д.) заряженный продукт обычно поступает в приемную (сборную) емкость. Наличие большого количества заряженного продукта в емкости, высокая его плотность приводят к тому, что внутри емкости возникают сильные электрические поля, что может вызвать образование опасных электрических разрядов. В связи с этим важное значение имеет расчет полей в емкости. При этом необходимо учесть два характерных случая:

- 1) быстрое заполнение емкости, когда можно пренебречь стеканием заряда продукта;
- 2) постепенное заполнение емкости, когда наряду с накоплением одновременно происходит стекание заряда продукта на Землю через заземленный металлический корпус емкости.

Расчет поля здесь проводится для цилиндрических электропроводящих емкостей. Считаем, что часть пространства занята продуктом в насыпном состоянии с объемной плотностью  $\rho_1$  и высотой  $h_1$ . Остальная часть емкости  $(H - h)$  заполнена продуктом, находящимся во взвешенном состоянии с объемной плотностью заряда  $\rho_2$ .

Методика расчета электрического поля в емкости в этом случае аналогична методике, изложенной ранее, и, с точки зрения опасности статического электричества, является наиболее важной.

Второй случай - расчет электрического поля в емкости с учетом утечки зарядов.

С целью разработки практической методики расчета электрического поля в емкости, заполненной заряженным продуктом, принимаем следующую модель. За время  $t_i$  в бункере образуется  $i$ -й слой заряженного продукта высотой  $h_i$  и радиусом  $R_i$ . Наложение слоев в емкости учитывается в правой части уравнения (3.1) при подстановке  $\rho$ . Необходимо иметь в виду, что процесс изменения  $\rho$  происходит медленнее, чем процесс установления поля. Время  $t_i$  зависит от скорости заполнения емкости, то есть от производительности установки, габаритов емкости и принятых размеров слоев. Утечку заряда определяем по формуле

$$\rho = \rho_0 e^{-\beta t}, \quad (3.1)$$

где  $\beta = 0,59 \frac{\gamma_{\text{сл}}}{\varepsilon_0 \varepsilon}$ ;  $\gamma_{\text{сл}}$  – удельная электропроводность.

Пусть засыпан первый слой с объемным зарядом  $\rho_0$ , высотой  $H_1$ , радиусом  $R_1$ . Через  $t_2$  над первым слоем образуется второй слой размерами  $H_2$ ,  $R_2$  и объемным зарядом  $\rho_0$ . Утечка заряда из первого слоя определяется по формуле

$$\rho_1 = \rho_0 e^{[-\beta(t_2 - t_1)]}. \quad (3.2)$$

За время  $t_3$  над первым слоем образуется третий слой размерами  $H_3$ ,  $R_3$  и объемным зарядом  $\rho_0$ . К этому времени остаточные заряды в первом и втором слоях будут соответственно

$$\rho_1' = \rho_0 \exp[-\beta(t_3 - t_1)], \quad (3.3)$$

$$\rho_2 = \rho_0 \exp[-\beta(t_3 - t_2)]. \quad (3.4)$$

Рассуждая аналогично, получим к моменту времени  $t_n$  для  $i$  слоя

$$\rho_i = \rho_0 \exp[-\beta(t_n - t_1)], \quad (3.5)$$

а для  $n$  слоя:

$$\rho_n = \rho_0. \quad (3.6)$$

Следовательно, в любое дискретное время  $t_1, t_2, \dots, t_n$  мы имеем в соответствии с этими формулами дискретное распределение объемной плотности зарядов  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  по высоте емкости.

Таким образом, при заполнении емкости продуктом с объемной плотностью заряда  $\rho_i$  соответствующего  $i$ -того слоя необходимо учесть значения  $\rho$  во всех низлежащих  $(n-1)$  слоях. В правой части уравнения Пуассона имеем значение  $\rho = \text{const}$  для определенного значения времени и слоя. Поэтому, например, для 20 слоев нужно 20 раз делать расчет поля, учитывая граничные условия и составляя системы уравнений, а затем путем наложения полей определить значения потенциалов. В этом случае электродинамическая задача сведена к электростатической. Безусловно, расчет проведенного по начальному значению удельного заряда продукта, поступающего в емкость, не учитывает утечки заряда продукта за счет газового разряда. В связи с этим значения потенциала получаются завышенными. Однако целесообразность такого расчета не вызывает сомнения, так как свидетельствует о реальной искроопасности этого участка технологической системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миролябов Н.Н.** и др. Методы расчета электрических полей. – М.: Высшая школа, 1963. – 415 с.
2. **Янке Е., Эмде Ф.** Специальные функции. – М.: Наука, 1964. – 342 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.02.2006.

**Ն.Է. ԷՎՈՅԱՆ, Գ.Ա. ԿԱՐԴԱՇՅԱՆ**

### **ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԸ ԱՌԱՆՁՆԱՊԵՍ ԶԳԱՅՈՒՆ ՆՅՈՒԹԵՐՈՎ ՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ ՏԱՐԱՆԵՐՈՒՄ**

Մշակված է էլեկտրական դաշտերի հաշվարկի մեթոդիկա՝ բարձր դիսպերսայնությամբ նախապայթեցում հրահրող նյութերով տրանսպորտային տարաներում, ստատիկ էլեկտրականացման երևույթի և բռնկման գնահատականի տեսակետից:

*Առանցքային բառեր.* մեթոդ, էլեկտրական դաշտ, լիցք, պոտենցիալ, փոշիացված նյութ, ներհոսք, կայծ, տարողություն, երկֆազ համակարգ:

**N.E. EVOYAN, G.A. KARDASHYAN**

### **ELECTRIC FIELD IN TRANSPORT CONTAINERS BY SPECIALLY SENSITIVE SUBSTANCE**

A method of analysing high dispersive pre-explosion inducing substances in the transport containers, with the point of view of the electrostatic phenomenon and the flashing is developed.

**Keywords:** method, electric field, charge, potential, powder material, leakage, spark, capacity, two-phase system.